INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Granularité dans les représentations spatio-temporelles

Jérôme Euzenat

N° 2242
Avril 1994

PROGRAMME 3

Intelligence artificielle,
systèmes cognitifs et
interaction homme-machine

Rapport de recherche

1994

ISSN 0249-6399

Granularité dans les représentations spatio-temporelles

Jérôme Euzenat*

Programme 3 — projet Sherpa

Rapport de recherche n° 2242 — Avril 1994 — 62 pages

RÉSUMÉ: Afin de représenter le temps sous plusieurs niveaux de détail, une représentation temporelle granulaire est proposée. Une telle représentation dispose les entités temporelles dans différents espaces organisés hiérarchiquement et nommés *granularités*. Elle conduit à conserver la représentation symbolique du temps et à simplifier la représentation numérique. Par contre, elle nécessite la définition d'opérateurs de conversion des représentations entre deux granularités afin de pouvoir utiliser une même entité temporelle sous différentes granularités.

Les propriétés que doivent respecter ces opérateurs afin de conserver les interprétations classiques de ces représentations sont exposées et des opérateurs de conversion symboliques et numériques sont proposés. Sous l'aspect symbolique, les opérateurs sont compatibles avec la représentation des relations temporelles sous forme d'algèbre de points et d'intervalles. En ce qui concerne la conversion numérique, certaines contraintes doivent être ajoutées afin de disposer des propriétés escomptées. Enfin, des possibilités d'utilisation de la latitude laissée par la définition des opérateurs sont discutées et l'extension de la représentation granulaire à d'autres espaces est explorée.

MOTS-CLÉS: Représentation temporelle — Représentation spatiale — Points de vue — Granularité — Localité — Histoire.

Version du Vendredi 22 Avril 1994

Ce rapport est une version étendue de [Euzenat 93]; il contient en particulier une annexe des programmes permettant d'établir les propriétés des opérateurs proposés, une discussion plus longue des motivations, la discussion de l'extension du travail à l'espace et la partie manquante de la version publiée.

* Jerome.Euzenat@imag.fr

Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes
IMAG-LIFIA, 46, avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex 1 (France)
Téléphone: +33 76 57 47 77 — Télécopie: +33 76 57 47 54

Établissement public national à caractère scientifique et technologique - Décret N°85.831 du 2 août 1985

Granularity in representation of time and space

Jérôme Euzenat

ABSTRACT: Temporal granularity is introduced in order to consider time under several temporal levels. Such a temporal representation lets the usual symbolic time axiomatisation unaltered and simplifies numerical representation. However, it requires conversion operators in order to share a same temporal entity between several granularities.

After a discussion about properties that conversion operators must satisfy in order to preserve the interpretation of the representations, symbolic and numeric conversion operators are presented. At a symbolic level, they are compatible with the algebraic temporal relations. Concerning numeric conversion, some constraints must be added in order to satisfy the expected properties. Moreover, numeric operators allow to take into account domain-dependent knowledge in their design. Some proposals for such operators are discussed and the extension of granularity towards other kind of spaces is investigated.

KEY WORDS: Time representation — Space representation — Standpoints — Granularity — Locality — Story.

Granularité dans les représentations spatio-temporelles

Jérôme Euzenat

1. Des points de vue à la granularité

La description de connaissance couvrant des domaines divers et étendus conduit à la complexification difficilement appréhendable de la base de connaissance. C’est de cette préoccupation que naît la notion de *point de vue* en représentation de connaissance. Le point de vue est un sous-ensemble d’une base de connaissance pertinent suivant un critère particulier. Cela peut être la vision qu’un spécialiste d’une certaine discipline a d’un problème ou l’ensemble de la connaissance accessible dans une certaine situation. Il permet de structurer une base de connaissance globale de façon à ce qu’un point de vue n’accède qu’à la partie de la base pertinente pour celui-ci. Le point de vue permet donc de réduire la difficulté d’un raisonnement à produire sur un problème local (à un certain domaine ou à un certain espace) en se concentrant sur les données utiles. Un nombre croissant de systèmes font varier la présentation des données selon un «point de vue» (voir [MAR 93] pour une bibliographie complète).

Structurer hiérarchiquement un domaine est une démarche naturelle pour considérer la même réalité sous plusieurs niveaux de détail — ordonnés ou non — ou *granularités*. Une telle hiérarchisation, en concentrant la manipulation des entités sur le niveau adéquat, permet souvent un gain de performance. Deux exemples naturels sont le temps et l’espace parce qu’un ordre fondé sur la discrétisation d’un espace métrique peut servir de support à la granularité. Ainsi, dans le cas d’un attentat contre un chef d’état les évènements sont exprimables à divers niveaux:

— Pour les protagonistes, une bombe doit éclater lorsque la cible est dans la pièce où se trouve la bombe et après que l’agresseur en soit sorti.
— Pour ses contemporains, la cible doit être tuée avant qu’elle ne quitte la ville.
— Pour l’historien de l’époque contemporaine, par contre, il importe que la cible soit tuée durant l’année 17.
— Enfin, à l’échelle de l’histoire de l’humanité, il est probable que cet incident ne sera pas visible.

En conséquence, la vision des choses est différente suivant le point de vue adopté. Ceci s’applique en particulier au temps et va affecter la granularité avec laquelle celui-ci doit être représenté: pour le protagoniste, le contemporain, l’historien de l’époque contemporaine et celui de l’humanité respectivement la granularité est d’une minute, d’une semaine, d’une année ou d'un siècle. Cette granularité peut être aussi spatiale: pour le protagoniste, elle est limitée à une pièce, pour le contemporain à une ville…

Au delà des espaces euclidiens, la structure peut être plus intimement liée à un domaine concret. Elle peut être mise en évidence, par exemple, lors de la compréhension de récit: le texte «Avant d'aller au marché, je suis allée chercher le courrier. Au moment où j'ouvrais la boîte à lettres, le facteur arrivait» n'est compréhensible qu'en sachant décomposer à un niveau de détail particulier l'action d'«aller chercher le courrier». En effet, l'action «j'ouvrais la boîte à lettres» n'est pas référencée explicitement dans une autre partie du texte. Ainsi, positionner le moment où «le facteur arrive» dans cette histoire requiert un surplus de connaissance: savoir qu'«aller chercher le courrier» nécessite d'«ouvrir la boîte à lettres».

Il convient de noter que, si la granularité a été introduite au travers des points de vue (avec lesquels elle répond au besoin d'opérer une sélection sur la connaissance accessible), ces deux notions ne sont pas forcément liées. En particulier, il est possible d'imaginer un spécialiste manipulant des entités de granularités différentes et plusieurs spécialistes partageant des entités de même granularité. La granularité provient de la hiérarchisation de points de vue fondée sur la résolution des entités qui y sont représentées.

Les points de vue ont cependant une autre justification, plus méthodologique: celle de représenter la connaissance de différents «spécialistes» et manipuler la connaissance disponible à différentes échelles; c'est le cas des modèles de «tableaux noirs». Cela permet, d'une part d'exprimer indépendamment la connaissance de ces spécialistes, et, d'autre part, de les faire collaborer en échangeant la connaissance entre les points de vue. Si la granularité a, pour l'instant, été envisagée de manière isolée, il est clair qu'étant née d'une hiérarchisation de différentes représentations, elle a un rôle à jouer dans la communication entre spécialistes.

Il est donc nécessaire de communiquer la connaissance d'un niveau de représentation vers un autre, et, par conséquent, de disposer de règles de conversion des représentations granulaires d'une granularité vers une autre (et ainsi, d'un point de vue vers un autre) les deux ayant la même interprétation. Cependant, la définition de tels opérateurs se révèle problématique: comment ordonner les performances obtenues au 100m messieurs par Hary (1960, 10"2), Borzov (1972, 10"14) et Wells (1976, 10"25) aux jeux olympiques sachant que la première est chronométrée avec une précision de 1/10° et les deux suivantes de 1/100° de seconde? Il n'existe pas de réponse dans l'absolu: la différence de précision est telle qu'elle empêche de conclure. Cependant, il est clair que la performance de Hary est meilleure que celle de Burke (1896, 12" à la seconde). Il y a donc des règles minimales qui doivent être respectées par des opérateurs de conversion. Ces règles permettront la communication, et donc l'exploitation, de données acquises sous une certaine granularité vers une autre granularité.

La granularité a déjà été envisagée de manière générale par Jerry Hobbs [HOB 85] qui distingue une granularité a posteriori (où le niveau de détail est déterminé en fonction des entités que l'on veut y voir) d'une granularité a priori (déterminée indépendamment de ce qui doit être représenté). Il faut déjà noter de cette dichotomie que la granularité n'est pas propre au phénomène observé, mais à l'observation (et l'utilisation) qui en est faite: la performance d'un coureur de sprint n'est pas intrinsèquement un temps à la seconde ou au 1/100° de seconde. Une granularité a priori va définir, avant toute utilisation, une fonction de congruence entre des expressions représentant le même domaine. La granularité temporelle est définie a priori (les années, par exemples, sont fixées sans tenir compte de ce qui s'y passe). Quand il s'agit de mesures numériques, cette granularité peut se traduire par une conversion régulière des unités ou échelle.

Le présent travail se concentre sur deux hiérarchies connues de tous: la hiérarchie existant entre des ordres de grandeur temporels (les millénaires, années, heures, secondes et bien d'autres) et une hiérarchie spatiale. L'objectif est de poser les bases pour une représentation granulaire du temps et de l'espace offrant la possibilité de représenter des entités à l'aide d'expressions sous différentes granularités et celle de convertir ces entités d'une granularité en une autre. Une large place est dédiée au temps pour lequel un système complet de représentation a été défini. La représentation spatiale n'est prise en compte que comme une extension de la première.

Indépendamment du travail présenté ici, divers auteurs se sont proposés d'examiner la granularité a priori [GAY 91, MON 92]. Les points de contact entre ces divers travaux seront évoqués au fur et à mesure de l'exposé; la section 8 détaillera les principaux points de divergence.

Le problème principal examiné ci-après est donc la représentation des entités temporelles sous plusieurs granularités, la conversion de ces entités d'une granularité vers une autre et la cohérence entre les représentation d'une même entité sous différentes granularités. Le premier point est abordé en utilisant les mêmes expressions que les représentations non granulaires. Le second en définissant des opérateurs de conversion de représentations d'une granularité vers une autre, que ce soit pour les représentations symboliques ou numériques. Enfin, le troisième point est traité par le respect d'un certain nombre de propriétés par les opérateurs de conversion. Ces propriétés garantissent que, dans une certaine mesure, les interprétations (principalement les rapports entre symbolique-numérique et instant-intervalles) des représentations sont conservées.

Les approches symboliques de représentation du temps sont d'abord rappelées (§2). Elles permettent de représenter des entités temporelles sans tenir compte du niveau de détail, mais s'interprètent convenablement par rapport à notre intuition du temps. Elles sont donc le candidat approprié pour représenter les entités temporelles sous chacune des granularités. Le lecteur au fait de ces représentations peut directement commencer à la section suivante qui propose une intégration de la granularité avec les approches classiques (§3). Les modifications nécessaires pour représenter le temps sur chacune des granularités y sont présentées avant d'aborder la question importante de savoir s'il est possible de maintenir la cohérence entre chacune des granularités. Des propriétés souhaitables sont alors proposées pour des règles de conversion des représentations temporelles granulaires d'une granularité vers une autre. Ces règles permettront la communication, et donc l'exploitation, de données acquises sous une certaine granularité vers une autre granularité. De tels mécanismes sont proposés aux §4 et 5. Il y sera montré qu'il est possible de représenter symboliquement le temps sous diverses granularités et de convertir les représentations d'une granularité vers une autre sans introduire de contradictions. Si, par contre, la représentation d'un évènement à un niveau de détail non adéquat introduit inévitablement une perte d'information, les résultats obtenus sur les opérateurs de conversion permettent de la minimiser.

Avant de conclure, deux extensions du travail présenté sont esquissées. Des méthodes pour intégrer la résolution de contraintes temporelles au sein d'une représentation du temps granulaire seront présentées (§6). Elles utilisent la connaissance du domaine pour combler partiellement le vide laissé par la représentation granulaire lors de la conversion des contraintes. Enfin, l'utilisation de la granularité pour la représentation de l'espace est envisagée (§7)

2. Représentation du temps

L'introduction de la granularité ne remplace pas les différentes représentations du temps qui ont été proposées en intelligence artificielle. Au contraire, elle en tire parti: la granularité est une façon de voir une entité temporelle particulière. Les approches classiques de représentation du temps sont donc brièvement abordées ici afin de les considérer ensuite dans la perspective d'une représentation du temps granulaire.

La prise en compte du temps peut se faire en définissant des représentations temporelles ou en tenant compte des relations temporelles entre évènements sans chercher à représenter leur moment d'occurrence. Le premier cas concerne les représentations du temps mesurable, le second celui des logiques temporelles incluant des modalités temporelles telles que «Past» et «Future».

Cependant, la sémantique des logiques temporelles ou dynamiques conduit à représenter le temps dans un modèle. Elles définissent donc leur propre représentation du temps. Tant que cette représentation du temps est définie implicitement (ou a posteriori) à partir des expressions syntaxiques, elle n'a pas à être explicitée. Cependant, l'implémentation de telles logiques fait de plus en plus usage de la réification de la sémantique [SHO 86], ce qui conduit à introduire, dans la syntaxe, la représentation du temps qui est définie dans la sémantique. La représentation explicite du temps est donc essentielle pour sa prise en compte par les représentations de connaissance.

Il est clair que la granularité n'a de sens que lorsque le temps est explicitement représenté et qu'elle prend tout son sens lorsque celui-ci est mesurable. Seule cette représentation explicite du temps sera étudiée ici. Tout d'abord, le modèle classique du temps mesurable (représentation numérique) sera brièvement évoqué (§2.1) avant de passer aux représentations symboliques principales (§2.2) et aux rapports qu'elles entretiennent (§2.3).

De nombreux aspects de la représentation temporelle n'ont pas été pris en compte ici. S'ils sont importants, ils ne subissent en général pas l'influence de la granularité. Ils peuvent être classés en deux catégories:

— Les aspects liés aux mécanismes de raisonnement: temps arborescent ou linéaire [MCD 81, SHO 86, DEA 87, BES 89], rapports avec les représentations non temporelles [MCC 69], nature des évènements (liquide, solide, périodique…) [MCC 69, MCD 81, ALL 83], causalité et chronologie [MCD 81, SHO 86], persistance et problèmes de raisonnement non monotone [MCD 81, SHO 86].
— Ceux liés à des caractéristiques du temps physique et à sa dynamique: irréversibilité, situation du temps du système dans la représentation (l'instant présent) [ALL 83, DEA 89], problèmes de format [HAJ 89, DEA 87], temps mesurable/non mesurable.

2.1. Représentation numérique du temps

Un modèle classique du temps est l'ensemble des réels $\mathbb{R}$. Le temps peut donc être représenté par une droite dont les instants sont les points et les intervalles des segments. Cette représentation numérique a l'intérêt d'être un modèle des représentations symboliques présentées ci-dessous. Il est donc important de conserver la cohérence entre ce modèle et les résultats symboliques. Le but de tous les résultats présentés par la suite est le respect de cette cohérence.

L'inférence temporelle dans un tel cadre est réduite à la résolution d'équations de variables réelles ou à un calcul sur les réels permettant de déterminer la position des points séparés par une certaine distance.

D'autres travaux utilisent un modèle plus complexe permettant de représenter l'incomplétude de la connaissance par plusieurs droites ou des collections de demi-droites à partir de certains points. Ce dernier cas est celui des logiques modales temporelles [BES 89] et du travail de Drew Mac Dermott [MCD 81]. La structure de droite temporelle s'y retrouve cependant pour traiter les chroniques, séries d'évènements en relation linéaire. Ici, la considération de plusieurs branches temporelles distinctes ne sera pas abordée.

2.2. Représentation symbolique du temps

Deux types d'expressions temporelles sont généralement considérés dans les représentations symboliques: l'expression temporelle qui dure (intervalle) et celle qui ne dure pas (instant). Ces approches sont présentées ci-dessous. Elles peuvent se classer en deux ensembles, suivant qu'elles considèrent l'instant (§2.2.1) ou l'intervalle (§2.2.2) comme objet primitif. Considérer la granularité permet de réduire ces deux notions l'une à l'autre. Les tentatives d'unification des deux approches seront donc étudiées ensuite (§2.3).

2.2.1. Les instants

L'*instant* est l'entité temporelle sans durée (ou ponctuelle par analogie avec un point sur une droite). Un instant peut être représenté numériquement par une date. Représenter les instants de manière symbolique consiste à les identifier et à les mettre en relation. Il existe trois relations primitives et exclusives deux à deux entre instants qui sont: «avant» (<), «après» (>) et «au même instant» (=). L'ensemble {<, =, >} est nommé A_3.

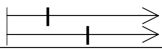
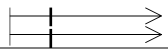
relation (r): *x1* r *x2*	*x1*/*x2*	réciproque: *x2* r^{-1} *x1*
avant (<)		après (>)
égale (=)		=

Table 1. Les trois relations entre deux instants *x1* et *x2*.

Il est possible de déduire la relation entre deux instants *x* et *z* qui n'a pas été explicitement communiquée en propageant les relations déjà connues par ailleurs. Ainsi, si *x* est simultané ({=}) à l'instant *y* et que celui-ci est antérieur ({<}) à l'instant *z*, il est possible d'en déduire la relation $x\{<\}z$. Ceci est nommé *composition* des relations temporelles. L'opérateur $\times_3$ de composition de relations est représenté par une table de transitivité (table 2). Elle indique bien que $= \times_3 <$ donne {<}.

$\times_3$	>	=	<
>	>	>	< = >
=	>	=	<
<	< = >	<	<

Table 2. Table de transitivité des relations symboliques entre instants.

Marc Vilain et Henry Kautz ont proposé un algorithme de propagation de contraintes temporelles en $O(n^4)$ [VIL 86, VAN 89] pour A_3 (ou pour l'ensemble des contraintes exprimables — voir §2.2.3 — à partir de A_3).

2.2.2. *Les intervalles*

L'*intervalle* est l'entité temporelle qui dure. Par analogie à la droite, il peut être assimilé à un segment. C'est ainsi que l'intervalle sera représenté de manière numérique, soit par une date de début et une date de fin, soit par une date de début et une durée. Les travaux de James Allen [ALL 83] considèrent les intervalles comme entités uniques d'une représentation temporelle symbolique. Ces intervalles peuvent être manipulés via un ensemble de relations temporelles entre eux. Il existe 13 relations possibles et mutuellement exclusives entre deux intervalles (voir table 3); leur ensemble est nommé A_{13}. Elles permettent, en particulier, de décomposer graduellement un intervalle en considérant les relations que celui-ci entretient avec ses sous-intervalles.

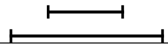
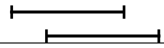
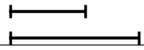
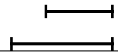
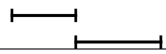
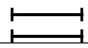
relation (r): *x1* r *x2*	*x1/x2*	réciproque: *x2* r^{-1} *x1*
avant (b)		après
pendant (d)		englobe
commence avant (o) (et termine avant)		finit après (et commence après)
commence (s) (et termine avant)		est commencé par (et termine après)
termine (f) (et commence après)		est terminé par (et commence avant)
termine au début (m)		commence à la fin
égale (e)		e

Table 3. Les 13 relations entre deux intervalles *x1* et *x2*.

L'opérateur $\times_{13}$ de composition de relations est représenté par une table de transitivité [ALL 83], similaire à la table 2, qui permet de déduire d'un ensemble d'intervalles et de contraintes entre intervalles, les relations possibles entre deux intervalles quelconques.

James Allen et d'autres ont proposé diverses stratégies de propagation de contraintes temporelles. Un algorithme de propagation en $O(n^3)$ a été proposé qui ne garantit que la 3-consistance (consistance des relations entre tout groupe de trois intervalles) [ALL 83]. Cet algorithme est cependant complet pour un sous-ensemble des relations de Allen dites relations convexes.

2.2.3. *Extension à l'information incomplète*

Soit Γ représentant A_{13} ou A_3, $\vee$ la disjonction et $\times$ l'opérateur de composition de l'ensemble de relations concerné, les notations ci-dessous seront utilisées (voir [GHA 89] pour un exposé algébrique unifié des deux relations ainsi que les propriétés des structures fondées sur 2^{Γ}: d'une manière générale, $<2^{\Gamma}\ \subseteq\ \times>$ est une algèbre de relations binaires [BAR 70]). L'incertitude quant à la position d'une entité temporelle x par rapport à une autre entité temporelle y de même nature sera exprimée par un sous ensemble ρ de Γ s'interprétant comme la disjonction des relations de ρ:

$$x\rho y \;=\; \bigvee_{r \in \rho} x r y$$

Ainsi, $x\{b\ m\}y$ signifie que l'évènement x est antérieur ou termine au début de l'évènement y.

Par abus de langage, les conventions suivantes sont utilisées dans la suite:

- Quand les résultats seront valides pour les deux algèbres, aucune distinction ne sera faite entre les entités temporelles manipulées. Les ensembles supports (A_{13}, A_3), de même que l'opération de transitivité $\times$, ne seront plus distingués;
- La lettre grecque ρ représentera un sous-ensemble de l'ensemble support correspondant ($\rho\subseteq\Gamma$); la lettre «r» en sera un élément (une relation).
- ρ^{-1} représentera l'ensemble des relations réciproques des éléments de ρ: $\{r^{-1}; r\in\rho\}$.
- $\rho_1\times\rho_2$ représente la distribution de $\times$ sur $\vee$:

$$\rho_1\times\rho_2 = \bigcup_{r_1\in\rho_1,\ r_2\in\rho_2} r_1\times r_2$$

2.3. Unification des instants et intervalles

Devant l'importance des deux types de représentation, il existe de nombreuses tentatives d'unification des approches ou d'expression de l'une dans l'autre. Elles sont présentées ici car les sections suivantes montreront que ces unifications possibles sont conservées par la définition de la représentation granulaire.

Drew Mac Dermott a défini des intervalles exprimés en fonction des instants afin de rendre compte des évènements solides (qui sont vrais sur un intervalle, mais sur aucune sous-partie de cet intervalle) [MCD 81]. Pour cela chaque intervalle est caractérisé par son instant de début et son instant de fin. Un tel intervalle x peut donc s'exprimer par $<x^-\ x^+>$ avec $x^-\{<\ =\}x^+$. Un problème reste à résoudre, celui de l'appartenance des extrémités des intervalles à celui-ci. L'avantage de la représentation de Mac Dermott est qu'elle permet d'exprimer tous les types d'intervalles ($[x^-\ x^+]$, $[x^-\ x^+[$, $]x^-\ x^+]$, $]x^-\ x^+[$): il suffit d'ajouter les axiomes correspondants. Cependant, le nombre d'axiomes alors nécessaires pour exprimer l'ensemble des relations de James Allen devient très important. Pour cela, James Allen propose d'utiliser une convention arbitraire: un intervalle $<x^-x^+>$ représente un intervalle fermé au début et ouvert à la fin: $[x^-\ x^+[$. Cette convention sera utilisée dans la suite, cependant les résultats restent valides si la convention inverse ($]x^-\ x^+]$) est utilisée.

Les relations entre intervalles peuvent alors être exprimées en fonction de celles sur les instants (voir table 4). N'importe quelle relation entre deux intervalles $x=<x^-\ x^+>$ et $y=<y^-\ y^+>$ peut être ainsi représentée par un quadruplé (r_1, r_2, r_3, r_4) de relations entre leurs extrémités correspondant à l'expression:

$$<x^- \ x^+> (r_1, r_2, r_3, r_4) <y^- \ y^+> \equiv x^- \, r_1 \, y^- \wedge x^- \, r_2 \, y^+ \wedge x^+ \, r_3 \, y^- \wedge x^+ \, r_4 \, y^+$$

sachant que, par ailleurs, $x^-<x^+$ et $y^-<y^+$, toutes les relations possibles entre ces quatre instants sont exprimables dans ce quadruplé (voir table 4). Afin d'exprimer les transformations symboliques des intervalles vers les instants, le symbole ⇒ sera utilisé. Ainsi, $\Rightarrow x$ représentera un intervalle converti en un couple d'extrémités et ⇒r une relation entre intervalles convertie en un quadruplé de relations entre extrémités. ⇒ est étendu aux ensembles de relations et l'image $\Rightarrow\rho$ d'un ensemble de relations entre intervalles ρ (représentant une disjonction de formules atomiques) est un ensemble de quadruplés (représentant une disjonction de conjonctions de formules atomiques entre instants). Ainsi:

$$<x^- \ x^+> \left[\bigcup_{i=1}^{n} \{(r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4})\} \right] <y^- \ y^+> \equiv \bigvee_{i=1}^{n} x^- r_{i1} y^- \wedge x^- r_{i2} y^+ \wedge x^+ r_{i3} y^- \wedge x^+ r_{i4} y^+$$

ce qui représente une forme normale pour ces relations. Comme toute formule représentant des relations entre quatre instants x^-, x^+, y^- et y^+ respectant les propriétés des intervalles ($x^-<x^+$ et $y^-<y^+$) peut être mise sous cette forme, il est possible de définir l'opérateur inverse ⇐ qui convertit un couple d'instants en un intervalle et un ensemble de quadruplés représentant cette formule en un ensemble de relations entre intervalles (il faut que les couples d'instants permettent de former des intervalles). Bien entendu, les deux opérations (⇐ et ⇒) sont inverses l'une de l'autre.

x r y	$x^-r_1y^-$	$x^-r_2y^+$	$x^+r_3y^-$	$x^+r_4y^+$	x r^{-1}y	$x^-r_1y^-$	$x^-r_2y^+$	$x^+r_3y^-$	$x^+r_4y^+$
b	<	<	<	<	b^{-1}	>	>	>	>
d	>	<	>	<	d^{-1}	<	<	>	>
o	<	<	>	<	o^{-1}	>	<	>	>
s	=	<	>	<	s^{-1}	=	<	>	>
f	>	<	>	=	f^{-1}	<	<	>	=
m	<	<	=	<	m^{-1}	>	=	>	>
e	=	<	>	=	e	=	<	>	=

Table 4. Les 13 relations entre intervalles exprimées en fonction des extrémités des intervalles.

Il est aussi possible de définir des relations entre instants et intervalles liant étroitement les deux représentations. Trois relations exclusives sont alors obtenues (voir table 5).

Les relations représentées dans la table 5 ne sont pas les cinq relations qui seraient obtenues avec la méthode utilisée pour obtenir la table 3 (avant, commence, pendant, termine et après). En effet, ce tableau est plus adapté au choix de considérer les intervalles comme fermés au début et ouverts à la fin: le statut de «commence» n'est plus comparable à celui de «termine». Cependant, les deux options ont exactement les mêmes propriétés vis-à-vis de la granularité.

relation (r)	x r y
avant (<)	x {<} y^-
pendant ($\in$)	y^- {<=} x {<} y^+
après (>)	y^+ {<=} x

Table 5. Les relations entre instants et intervalles exprimées en fonction des relations entre instants.

James Allen a essayé de montrer que les intervalles peuvent représenter des instants. Il signale que, pour cela, il est possible de reprendre la représentation des intervalles en fonction des instants et de considérer qu'un instant est un intervalle arbitrairement petit (un intervalle de taille nulle posant d'importants problèmes d'interprétation). Cette notion est encore rendue plus précise (dans le cadre d'un temps mesurable) en considérant qu'un instant est un intervalle dont la durée est inférieure à une mesure ε. Cependant, ce type d'intervalle est inexprimable dans le seul système des intervalles.

Le temps peut donc être représenté sous forme numérique et symbolique à l'aide de différents systèmes. La cohérence de ceux-ci est garantie au sens où il est possible d'interpréter ces systèmes les uns en fonction des autres (table 4 et interprétation des expressions comme des points ou segments temporels). Ces interprétations sont, sinon complètes (un ensemble de relations accepte plus d'un modèle en général alors qu'il est souvent censé représenter une seule réalité), du moins non contradictoires (ce qui se dérive d'un ensemble de relation est compatible avec tous ses modèles).

Ces représentations vont être utilisées comme représentations du temps sur une granularité. Le travail présenté ici s'efforcera de garantir que les modèles de la réalité à représenter sont conservés sous toutes les granularités.

3. Représentation temporelle granulaire

La façon de représenter une entité sous une granularité précise et les conséquences et différences que cela entraîne par rapport aux représentations classiques du temps sont abordées en premier (§3.1). Puis, les rapports possibles entre les différentes granularités sont présentés (§3.2). Enfin, en vue de permettre la communication d'informations d'une granularité vers une autre, les propriétés escomptées des opérateurs de conversion d'entités temporelles entre deux granularités sont proposées (§3.3).

3.1. Représentation explicite du temps sous une granularité

Un des objectifs de la granularité est de disposer d'un système complet capable de représenter le temps à une échelle donnée. Il est donc utile de disposer des deux systèmes proposés plus haut, ensemble ou séparément, et d'une représentation mesurable qui puisse être compatible avec ces deux systèmes. Sous une granularité donnée, l'expression d'une entité temporelle ne fait pas appel à cette granularité qui reste implicite. Par conséquent, il est possible d'utiliser les deux systèmes et de conserver les relations qui existent entre les deux représentations données au §2.3 ainsi que la cohérence interne de chacun des systèmes. Seuls quelques points non négligeables subissent l'influence de la granularité. Ils sont présentés ici. Les difficultés de conservation de la cohérence de ces représentations apparaîtront dans les relations entre différentes granularités.

3.1.1. Représentation numérique ou mesurable

Le point de départ de la représentation est la définition de la granularité (notée g, g' ou g" par la suite): la taille du plus petit évènement pertinent. La définition selon laquelle un instant est un intervalle arbitrairement petit trouve une réalité ici puisqu'un instant est un intervalle $<x^- \; x^+>$ tel que $|x^+-x^-|<g$. La granularité prend alors la place de ε dans cette proposition.

Ainsi, un intervalle qui s'exprime en secondes par [4200 4500[sera vu en minutes comme [70 75[et en heures comme l'instant 1 (l'instant correspondant à l'heure numéro 1). Il est clair que passer à l'échelle des heures fait perdre en précision par rapport à l'échelle des minutes (en particulier quant à la durée de l'expression temporelle), mais ceci n'est que la conséquence d'une granularité trop grossière pour rendre compte de la durée. Tout ceci impose d'ores et déjà des règles de conversion du temps mesurable qui seront examinées au §3.3: un intervalle peut devenir un instant ou disparaître si la granularité est augmentée.

Le corollaire de cette définition est qu'il n'est pas nécessaire d'exprimer un phénomène en dessous de la granularité considérée. Par conséquent, toute expression temporelle pourra être exprimée en fonction de cette échelle et l'ensemble des instants peut devenir isomorphe à $\mathbb{N}$ et non plus à $\mathbb{R}$. Il n'est, en effet, plus nécessaire d'introduire des subdivisions dans le temps: elles ne sont pas pertinentes. En fait, l'utilisation de la granularité permet d'approcher le temps continu en des représentations de plus en plus fines de celui-ci sans jamais l'atteindre. C'est tout l'avantage de la granularité sur des filtres de transformation de format qui présentent sous un grain important (par exemple, en années) des entités temporelles de grain très fin (par exemple, en secondes) sur lesquelles tous les calculs se font. Dans ce dernier cas, toutes les données doivent être communiquées et exploitées sur le grain le plus fin.

La représentation proposée ne permet donc plus de raisonner simplement sur la continuité mais offre une représentation mesurable plus compacte. Il est cependant possible de considérer les différentes granularités comme fonction d'un niveau de granularité minimal *dense* ($\forall x<z, \exists y; x<y<z$) [MON 92] ou continu. Ceci permet, tout en ayant les avantages des représentations granulaires, de ne pas se couper de la possibilité de raisonner sur la continuité. Cette possibilité ne sera pas étudiée ici.

Ce qui, conceptuellement, pose problème n'est pas de construire une relation de congruence de $\mathbb{R}$ vers $\mathbb{N}$ (il suffit de découper $\mathbb{R}$ en segments de taille 1), mais de construire une relation de congruence de $\mathbb{N}$ vers $\mathbb{N}$, sachant qu'à un élément de l'ensemble image correspondent plusieurs éléments de l'ensemble de départ. La difficulté peut être surmontée en ne considérant qu'un segment de l'ensemble des entiers (ou des rationnels dans le cas de [MON 92]) comme domaine de la plus petite granularité.

3.1.2. Instants et intervalles

Une autre conséquence de la granularité est qu'un intervalle, sous une certaine granularité, peut être vu comme un instant, sous une granularité plus grossière. Mais le concept de granularité laisse la porte ouverte à sa réciproque: en effet, il faut pouvoir s'attendre à considérer un instant comme un intervalle. Cela a déjà été évoqué par James Allen [ALL 83]: si l'action «aller chercher le courrier» peut être vue sous un certain point de vue comme instantanée, celle-ci peut être décomposée en «aller à la boîte à lettres», «ouvrir la boîte à lettres», «prendre la lettre» et «refermer la boîte à lettres». «Prendre la lettre» peut, à son tour, se décomposer en «regarder dans la boîte à lettres», «réaliser que c'est la lettre qui est perçue», «se saisir de la lettre». Il est possible de décomposer encore plus l'action «réaliser que c'est la lettre qui est perçue» en un ensemble d'inférences… Cette décomposition dépend, bien sûr, des points de vue utilisés. En ce sens, la granularité est un moyen d'unifier instants et intervalles temporels: une entité temporelle peut être représentée comme un instant ou un intervalle suivant la granularité sous laquelle elle est observée.

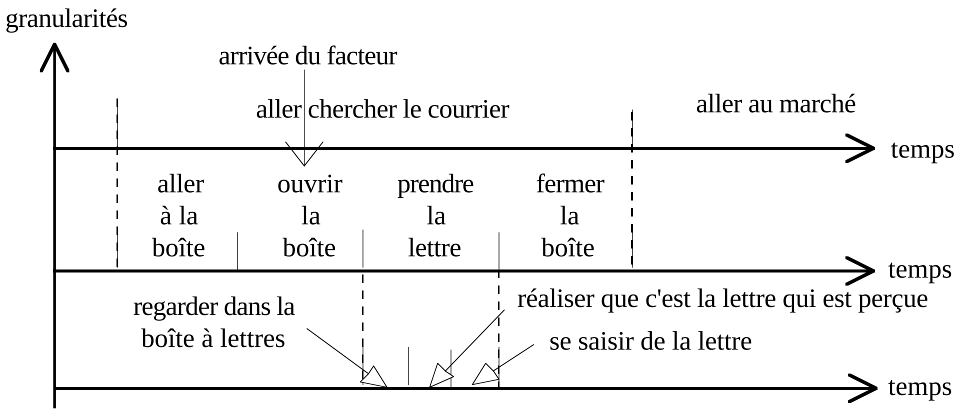


Figure 1. L'exemple du courrier.

En conséquence, les bornes d'un intervalle peuvent être des moments quelconques et, en particulier, des intervalles. Le modèle temporel n'en est pas plus puissant pour autant: en effet, même si les bornes d'un intervalle sont représentées par un autre intervalle (appelé intervalle-borne), il n'en restera pas moins vrai que la borne de l'intervalle est celle de l'intervalle-borne et ceci récursivement jusqu'à obtenir autre chose qu'un intervalle.

Par ailleurs, l'algèbre d'intervalles permettait déjà d'exprimer le fait qu'un intervalle termine ou commence un autre intervalle. Un intervalle qui en termine un autre est représenté simplement par deux intervalles x et y tels qu'ils soient en relation xfy. Il est possible d'exprimer ceci en fonction des instants par $x=<x^- x^+>$, $y=<y^- x^+>$ et $x^->y^-$.

3.1.3. *Granularité et unité*

La granularité a l'avantage de permettre d'exprimer les données automatiquement dans une unité qui sera considérée comme pertinente. Si cette unité se révélait ne pas être pertinente, elle peut, bien sûr, être convertie. À cet égard, il faut disperser la confusion qui réside bien souvent entre granularité et *format*. Dire qu'une expression temporelle doit être exprimée en jours-mois-années, c'est dire deux choses:

— que le format d'expression de l'unité est jour-mois-année;

— que la granularité de ce format est le jour.

Il n'est pas fait mention, ici, des problèmes de format mais uniquement de ceux liés à la granularité. De même, les unités considérées ici seront linéaires et non pas calendaires.

Sous une granularité donnée, la puissance d'expression des expressions temporelles est donc la même qu'avec les intervalles symboliques et une possibilité de mesure du temps permet de se ramener à une définition des instants en fonction de $\mathbb{N}$.

3.2. Structure de l'ensemble des granularités

Pouvoir exprimer des données et les manipuler sous une granularité donnée est utile mais pouvoir disposer des données introduites à un certain niveau temporel dans tous les niveaux où elles sont exploitables l'est encore plus. C'est par exemple le cas dans toute entreprise lorsqu'il s'agit de faire de la comptabilité analytique: le programmeur évalue son temps de travail en demi-journées qu'il transmet au comptable chargé de la gestion des ressources. Ce dernier traduit ce temps de travail en heures pour le service de la paye et en hommes*jours pour le service de facturation.

Il faut donc étudier comment les expressions vont circuler, non pas d'un point de vue à un autre, mais d'une granularité à l'autre. Pour cela, il faut définir les règles de circulation et de conversion des expressions temporelles.

Les granularités sont définies par la taille des plus petits évènements pertinents. Un modèle naturel pour une granularité est un nombre réel exprimant son rapport avec la granularité la plus petite utilisée. Soit G l'ensemble des granularités utilisées à un moment donné dans un système, l'ensemble G peut être structuré de différentes manières:

— pas de structure;
— une relation d'ordre partiel;
— une relation d'ordre total.

L'absence de relation d'ordre total sur l'ensemble des granularités peut provenir de deux sources:
— l'utilisation d'unités non comparables pour exprimer les granularités;
— l'utilisation de variables pour définir les granularités.

L'absence de structure peut relever des deux sources alors que la présence d'une structure partielle révèle la présence de variables dont seuls certains rapports sont connus. Quoi qu'il en soit, les problèmes de granularité variable ne seront pas abordés ici. Cette section, comme les suivantes, suppose que chacun des grains utilisés est convertible en n'importe quel autre grain. Pour cela, il suffit que le rapport entre chaque paire de granularités soit quantifié. Bien qu'il puisse en être autrement, cette hypothèse est bien utile car, sans elle, il est impossible d'exploiter numériquement une donnée fournie avec une granularité g sous un point de vue utilisant une granularité dans laquelle elle n'est pas convertible; c'est pourtant l'idée de la représentation proposée.

Pour un système donné, les granularités utilisées peuvent être ordonnées de manière stricte avec:
1) g_{min} défini comme le grain minimal utilisé ($g_{min} \in G$ et $\forall g \in G$, $g \geq g_{min}$);
2) m(grain) défini comme le rapport entre grain et g_{min} ($\forall g \in G$, $m(g)=g/g_{min}$).

Dans la suite, au lieu des granularités, seules leurs classes d'équivalence pour l'égalité seront considérées (avec $g=g'$ ssi $m(g)=m(g')$ et $g<g'$ ssi $m(g)<m(g')$). Par ailleurs, quelques restrictions supplémentaires sur la structure de l'ensemble des granularités seront observées (voir §4.2).

Dans le système proposé par [MON 92], le grain minimal à proprement parler n'existe pas car le dernier niveau de représentation est dense. Il est cependant possible de se ramener à ce qui est dit plus haut si l'on ne considère que les rapports entre granularités supérieures à ce dernier niveau et g_{min} comme la granularité de l'avant dernier niveau. Les rapports entre ce système et le dernier niveau sont partiellement évoqués dans [MON 92].

3.3. Circulation des expressions temporelles

La *circulation* est le mécanisme qui fait transiter une expression temporelle d'une granularité vers une autre. Il faut bien comprendre que ce n'est pas une «entité» temporelle qui circule (elle n'est pas intrinsèquement modifiée), mais sa représentation. Faire circuler les expressions temporelles permet de chercher comment une expression temporelle fournie au système sous une certaine granularité va pouvoir être exploitée avec une granularité plus fine ou plus large. Il s'agit donc de trouver la relation de congruence sur laquelle sont fondées les classes d'équivalence. Les différents types de représentations temporelles examinées ici sont soit symboliques, soit numériques, il est donc normal que les règles de circulations soient établies pour ces deux types de représentation.

Par ailleurs, les grains étant maintenant strictement ordonnés, il est possible de distinguer deux opérations de circulation: une *circulation ascendante* (ou montée) qui fait passer une expression d'un grain donné à un grain plus grossier et une *circulation descendante* (ou descente) qui, au contraire, fait passer une expression d'un grain donné à un grain plus fin. Il faut donc établir deux opérateurs de montée et de descente dont la signification est la suivante:

${}_{g}{\uparrow}^{g'}$: convertit une expression exprimée dans la granularité g sous la granularité g' (g<g').

${}^{g}{\downarrow}_{g'}$: convertit une expression exprimée dans la granularité g sous la granularité g' (g>g').

Dans ce qui suit, il sera aussi fait usage de l'opérateur générique

$$g{\rightarrow}g' \equiv \{{}_{g}{\uparrow}^{g'}, {}^{g}{\downarrow}_{g'}\} = {}_{g}{\uparrow}^{g'} \text{si } g<g',\ {}^{g}{\downarrow}_{g'} \text{si } g>g' \text{ et Identité sinon.}$$

L'opérateur «·» permet de composer les opérateurs de conversion de telle manière que $g{\rightarrow}g' \cdot g'{\rightarrow}g''x = g'{\rightarrow}g''(g{\rightarrow}g'x)$. La figure 2 présente les deux moyens de représenter les rapports entre deux granularités et celle qui sera utilisée ici.

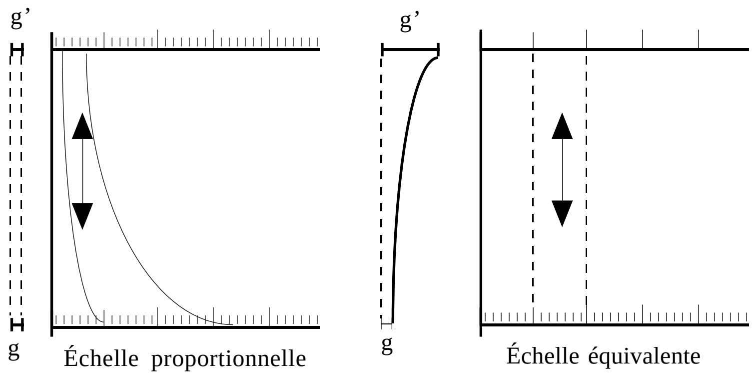


Figure 2. La granularité et la conversion peuvent être représentées sur deux échelles suivant que la granularité est toujours représentée par la même taille (échelle proportionnelle) ou que les différentes granularités sont représentées par leurs tailles relatives (échelle équivalente). C'est cette dernière qui sera utilisée dans les figures qui suivront (et déjà dans la figure 1).

Dans cette section, les propriétés générales souhaitables pour les opérateurs de conversion (ou de circulation) entre granularités sont posées dans l'absolu. Les deux parties suivantes (§4 et 5) présenteront des règles de circulation concrètes et le respect de ces propriétés sera étudié. Toutes les propriétés valides sont énoncées sans preuve. La preuve peut toujours s'obtenir aisément par une vérification exhaustive des assertions. Un programme réalisant toutes les preuves nécessaires ici se trouve dans l'annexe A.

3.3.1. Propriété des conversions de représentations numériques

Les expressions numériques sont représentées sur l'échelle des entiers. L'opérateur de montée est donc une opération de congruence qui, à une expression temporelle exprimée sous une granularité g, associe une classe d’équivalence qui est une expression temporelle exprimée en g’. Réciproquement, l’opérateur de descente associe à une expression temporelle, exprimée en g’, une expression temporelle, exprimée en g, qui peut être vue comme le représentant de la classe de cette expression en g. Une propriété naturelle prise en compte ici sera celle de *segmentation*: une classe d’équivalence correspond à un segment de droite (ensemble topologiquement clos) dans l’interprétation numérique.

La propriété de *non-croisement* (ou préservation de l’ordre) plus forte, empêche le croisement de deux entités (elle a été proposée par Jerry Hobbs [HOB 85]):

$$x > y \equiv \neg({}_{\mathrm{g}\to\mathrm{g}'}\, x < {}_{\mathrm{g}\to\mathrm{g}'}\, y)$$

Elle doit, bien sûr, être aussi valide au niveau symbolique si elle est requise du niveau numérique.

Une propriété intéressante est la *réciprocité*:

$${}_{\mathrm{g}}{\uparrow}^{\mathrm{g}'} \cdot {}^{\mathrm{g}'}{\downarrow}_{\mathrm{g}} x = {}^{\mathrm{g}}{\downarrow}_{\mathrm{g}''} \cdot {}_{\mathrm{g}''}{\uparrow}^{\mathrm{g}} x = x$$

Cette propriété est impensable: elle signifierait que l’ensemble des expressions temporelles exprimables le soient sous toutes les granularités et avec le même rapport (en particulier toute classe d’équivalence serait un singleton). La notion de granularité n’aurait alors plus aucun intérêt. En effet, si la granularité a un sens, il est naturel de perdre de l’information lors de sa conversion vers une granularité plus élevée où des entités bien distinctes peuvent devenir indiscernables et vers une granularité plus faible sous laquelle la position d’une entité n’est pas exactement connue.

La *transitivité générale* (${}_{\mathrm{g}\to\mathrm{g}'} \cdot {}_{\mathrm{g}'\to\mathrm{g}''}\, x = {}_{\mathrm{g}\to\mathrm{g}''}\, x$) n’est pas non plus possible car elle implique la réciprocité. La propriété de *transitivité cumulée* (ou monotone) est par contre très importante car elle garantit l’indépendance des résultats vis-à-vis des étapes successives que subit une expression temporelle pour monter ou descendre:

$${}_{\mathrm{g}}{\uparrow}^{\mathrm{g}'} \cdot {}_{\mathrm{g}'}{\uparrow}^{\mathrm{g}''} x = {}_{\mathrm{g}}{\uparrow}^{\mathrm{g}''} x \quad \text{et} \quad {}^{\mathrm{g}}{\downarrow}_{\mathrm{g}'} \cdot {}^{\mathrm{g}'}{\downarrow}_{\mathrm{g}''} x = {}^{\mathrm{g}}{\downarrow}_{\mathrm{g}''} x$$

Les implications de cette propriété seront examinées plus tard. Une autre propriété possible est celle de *conservation descendante*:

$${}_{\mathrm{g}}{\uparrow}^{\mathrm{g}'} \cdot {}^{\mathrm{g}'}{\downarrow}_{\mathrm{g}} x = x.$$

Il est, en effet, souhaitable que l’image représentant la classe d’équivalence soit dans cette classe d’équivalence.

3.3.2. *Propriétés des conversions de représentations symboliques*

La notion de granularité d’une relation temporelle symbolique est douteuse: dans l’absolu, la relation entre deux entités temporelles est toujours la même. Ce n’est cependant pas le cas des relations entre les représentations de ces entités qui, elles, subissent la granularité. Ces relations seront étudiées ici, car elles permettent de conserver une certaine cohérence entre représentation numérique et symbolique. Le problème de la circulation symbolique des relations temporelles consiste à savoir répondre à une requête

$$[g]: x \rho y\ ?$$

(sous la granularité g, x et y sont-elles en relation ρ?) en ne perdant pas de vue que x et y sont représentées à des niveaux g' et g" et que la requête concerne un niveau g.

Une première propriété à considérer est donc celle qui conserve les relations entre deux expressions temporelles:

$$x \rho y \equiv g{\rightarrow}g'\, x \rho\, g{\rightarrow}g'\, y$$

De nouveau, si la granularité a un sens, elle ne peut respecter une telle propriété: il est en effet naturel de considérer que deux expressions temporelles exprimées sous des granularités différentes peuvent devenir indiscernables. Ainsi, pour un ensemble de relations ρ, la notation $g{\rightarrow}g'\rho$ peut être conservée car la conversion à un sens. La notation pour les expressions temporelles proprement dites ($g{\rightarrow}g'$) sera utilisée pour les relations car la transformation d'une relation est conditionnée par celle des expressions temporelles. La relation proposée ci-dessus peut être prise en compte comme une contrainte à la représentation dans un seul sens:

$$\rho \Subset g{\rightarrow}g'\rho$$

En considérant que l'opérateur de conversion appliqué à un ensemble de relations donne un autre ensemble de relations, il est souhaitable que:

$$x \rho y \Rightarrow (g{\rightarrow}g'\, x)\ (g{\rightarrow}g'\, \rho)\ (g{\rightarrow}g'\, y)$$

Alors, sachant que:

$$x \rho y \equiv y \rho^{-1} x$$

et que,

$$y \rho^{-1} x \Rightarrow (g{\rightarrow}g'\, y)\ (g{\rightarrow}g'\, \rho^{1})\ (g{\rightarrow}g'\, x)$$

la *distributivité entre conversion et réciprocité* est obtenue:

$$(g{\rightarrow}g'\, \rho^{-1}) = (g{\rightarrow}g'\, \rho)^{-1}$$

Enfin, les conversions ascendantes et descendantes doivent être liées entre elles par un *principe de compatibilité* qui assure que si une relation peut être vue sous une granularité comme un ensemble de relations, alors chacune d'elles peut être vue sous la granularité initiale comme la relation initiale:

$$r \in \bigcap_{r' \in_g \uparrow^{g'} r} {}^{g'}\!\downarrow_g r' \text{ et } r \in \bigcap_{r' \in^g \downarrow_{g'} r} {}_{g'}\!\uparrow^g r'$$

Autrement dit, une fois connu le graphe d'un opérateur de conversion vu comme une relation dans Γ^2 l'opérateur de conversion opposé est vu comme la relation réciproque.

Il faut aussi étudier la *distributivité de* $g{\rightarrow}g'$ sur $\times$ (opérateurs de composition des relations):

$$g{\rightarrow}g'\, (\rho_1 \times \rho_2) = (g{\rightarrow}g'\, \rho_1) \times (g{\rightarrow}g'\, \rho_2)$$

Cela est important vis-à-vis du processus de résolution de contraintes temporelles qui va calculer les relations entre deux expressions sous une certaine granularité et exporter ensuite les résultats à tous les niveaux.

De même, il est souhaitable que l'application des opérateurs de conversion aux relations entre intervalles ne dépendent pas de leur expression (sous forme d'intervalles ou d'instants). La relation doit donc respecter la propriété d'*indépendance de la représentation*:

$$g{\to}g'\ \rho = \Leftarrow g{\to}g' \Rightarrow \rho \text{ et } g{\to}g'\ \rho = \Rightarrow g{\to}g' \Leftarrow \rho$$

sachant que l'opérateur de conversion s'applique sur les ensembles de quadruplés de relations entre instants en accord avec leur définition logique (il est distribué sur les sous-formules et la forme normale disjonctive est ensuite rétablie de manière à pouvoir appliquer $\Leftarrow$; voir §2.3.1). Cette propriété s'entend lorsque l'opération est définie, c'est-à-dire lorsque les relations entre instants n'interdisent pas qu'ils représentent des bornes d'intervalles. Elle n'est qu'une simple conséquence de la commutativité de $g{\to}g'$ et avec $\Rightarrow$ d'une part et $\Leftarrow$ d'autre part.

En résumé, les représentations classiques du temps sont conservées sur chacune des granularités. Ces représentations peuvent circuler d'une granularité à une autre moyennant certaines transformations. Un ensemble de propriétés permettant de conserver la cohérence entre les modèles des représentations disponibles sous différentes granularités ont été proposés. Des propositions concrètes vont être formulées dans les sections suivantes pour définir des opérateurs de montée et de descente tant au niveau symbolique qu'au niveau numérique.

4. Circulation ascendante

La circulation ascendante est affaire d'acquisition. Il s'agit de transmettre une information acquise sous une certaine granularité vers un point de vue de granularité plus grossière. Ceci est réalisé dans n'importe quel système: les capteurs ne fournissent des informations, et des informations temporelles en particulier, qu'avec une certaine précision. Cette précision n'est pas intrinsèque à ce qui est capté mais au capteur qui exprime la mesure avec une certaine granularité (problème de l'échantillonnage). L'acquisition initiale d'une donnée temporelle révèle une circulation ascendante implicite réalisée par le capteur. Celle-ci est ici généralisée et rendue explicite. Il faut noter que tous les problèmes qui vont être présentés se produisent déjà, et doivent être résolus, lors d'une circulation implicite.

4.1. Conversion ascendante symbolique

Deux problèmes se posent pour la montée des relations temporelles (la relation entre *x* et *y* n'est disponible que sous une granularité inférieure à g). Tout d'abord, les relations établies au niveau inférieur sont exportables tant que les unités mises en relation sont toujours visibles. L'autre problème est la perte de précision des relations/contraintes temporelles: en effet, sous une granularité g deux expressions temporelles peuvent être en relation de précédence stricte (b) mais cette relation peut s'atténuer si ces expressions temporelles sont converties dans une granularité plus élevée (b, m…).

En tenant compte de la contrainte de non-croisement et de toutes les imprécisions pouvant être introduites par la montée des expressions temporelles *x* et *y* (et ceci indépendamment des granularités considérées), le tableau de conversion ascendante des instants est le suivant:

relation: r	${}_{g}{\uparrow}^{g'} r$
<	< =
=	=
>	> =

Table 6. Conversion ascendante des relations entre instants.

Cette table obéit encore à la contrainte de non croisement. De même, les règles pour les intervalles sont fixées comme suit:

relation: r	${}_{g}{\uparrow}^{g'} r$	réciproque: r^{-1}	${}_{g}{\uparrow}^{g'} r^{-1}$
b	b m	b^{-1}	b^{-1} m^{-1}
d	d f s e	d^{-1}	d^{-1} s^{-1} f^{-1} e
o	o f^{-1} s m e	o^{-1}	o^{-1} s^{-1} f e m^{-1}
s	s e	s^{-1}	s^{-1} e
f	f e	f^{-1}	f^{-1} e
m	m	m^{-1}	m^{-1}
e	e		

Table 7. Conversion ascendante des relations entre intervalles.

Les tables de conversion ascendante des relations possèdent un certain nombre de propriétés. Tout d'abord, la montée et la réciprocité sont commutatives:

$$ {}_{g}{\uparrow}^{g'} \rho^{-1} = ({}_{g}{\uparrow}^{g'} \rho)^{-1} $$

D'autre part, elles sont indépendantes de la représentation. En effet, si les intervalles sont exprimés en fonction de leurs extrémités (voir table 4), les règles de conversions des extrémités donnent lieu aux mêmes relations entre intervalles que les règles de conversions entre intervalles (voir table 7).

Il faut bien remarquer qu'il n'est pas obligatoire de convertir avec l'aide du tableau de conversion une relation de faible granularité en une relation plus grossière. En effet, si une entité temporelle est avant une autre, cela est vrai dans l'absolu et ne dépend pas de la granularité dans laquelle est représentée l'entité. Une solution alternative consiste donc à conserver entre chaque instant ou intervalle la relation qui lui est fournie au niveau le plus précis. Toutes les propriétés évoquées plus haut seront alors valides, mais la liaison avec les opérateurs de conversion (numériques en particulier, voir §4.2) n'est plus assurée. Le tableau indique donc comment la relation entre deux entités serait vue si la précision la plus fine à laquelle ces entités étaient connues était celle de la granularité la plus élevée.

Toujours sous la même hypothèse de non croisement, la table de transitivité de $\times_3$ est bien distributive par rapport à la conversion ascendante.

$$({}_g\!\uparrow^{g'} \rho_1) \times_3 ({}_g\!\uparrow^{g'} \rho_2) = {}_g\!\uparrow^{g'} (\rho_1 \times_3 \rho_2)$$

Ce n'est pas le cas des intervalles. En effet, soient trois intervalles *x*, *y* et *z* tels que *x*b*y* et *y*d*z*, la règle de transitivité donne *x*{b o m d s}*z* ce qui, une fois converti dans une granularité plus basse, donnera *x*{b m e d f s o f^{-1}}*z*. Si, par contre, les relations sont converties d'abord, il en résulte *x*{b m}*y* et *y*{d f s e}*z*, ce qui, une fois la transitivité appliquée, rend *x*{b o m d s}*z*. Il semble donc que la caractérisation obtenue soit plus précise en opérant d'abord la conversion puis la propagation. En effet, en propageant avant de convertir, l'information qu'il existe un intervalle *y* interdisant à *x* de terminer *z* est perdue. Toute la question est de savoir s'il est nécessaire de disposer de toute la précision; peut-être l'espace occupé par *y* n'est-il pas pertinent sous la granularité la plus élevée. Il est impossible de savoir cela symboliquement.

La propriété suivante concernant la «distributivité» est vérifiée:

$$({}_g\!\uparrow^{g'} \rho_1) \times_{13} ({}_g\!\uparrow^{g'} \rho_2) \subseteq {}_g\!\uparrow^{g'} (\rho_1 \times_{13} \rho_2)$$

ce qui signifie que pour utiliser les contraintes de la manière la plus précise qui soit, à un niveau de granularité plus élevé, il faut d'abord les convertir avant de les propager. Tant de précision n'est pas toujours utile, mais a deux avantages: elle limite légèrement la possibilité de faire apparaître des inconsistances et elle a une représentation plus compacte.

La conversion instants/intervalles (table 5) est toujours compatible avec l'opérateur de montée, c'est-à-dire que la comparaison d'un instant et d'un intervalle sur la base des instants de début et de fin de ce dernier reste valide après une montée. La montée de ces relations est donc la fonction identité (si les expressions temporelles concernées persistent dans la montée).

4.2. Conversion ascendante numérique

La circulation ascendante ne pose pas de problème numérique. Ce type de conversion fait simplement disparaître certaines expressions et transforme certains intervalles en instants.

Pour définir l'opérateur de montée associant à une expression temporelle mesurée dans une granularité une autre expression mesurée dans une granularité plus élevée, il est possible de faire plusieurs choix (illustrés par la figure 3) respectant la contrainte de non croisement:

— l'instant précédent dans la granularité supérieure: ${}_g\mathrm{prec}^{g'}x$=E(x*g'/g) (cette option avait été retenue par Jerry Hobbs pour la granularité des mesures de température [HOB 85]);

— l'instant suivant dans la granularité supérieure: ${}_{g}\mathrm{suiv}^{g'}x$=E($x$*g'/g)+1;

— l'instant le plus proche dans la granularité supérieure
${}_{g}\mathrm{proche}^{g'}x$=si ($x$*g'/g-${}_{g}\mathrm{prec}^{g'}x$)<(${}_{g}\mathrm{suiv}^{g'}x$-$x$*g'/g) alors ${}_{g}\mathrm{prec}^{g'}x$ sinon ${}_{g}\mathrm{suiv}^{g'}x$.

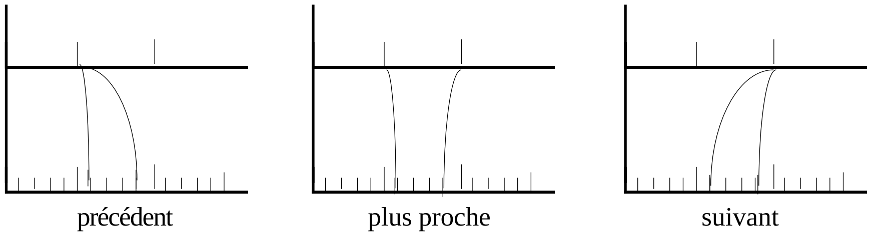


Figure 3. Les différents choix possibles de conversions ascendantes d'instants et intervalles.

L'opération similaire sur les intervalles consiste à rechercher le meilleur représentant pour l'expression temporelle «une soixantaine d'années»: s'agira-t-il de 60, 65 ou 70?

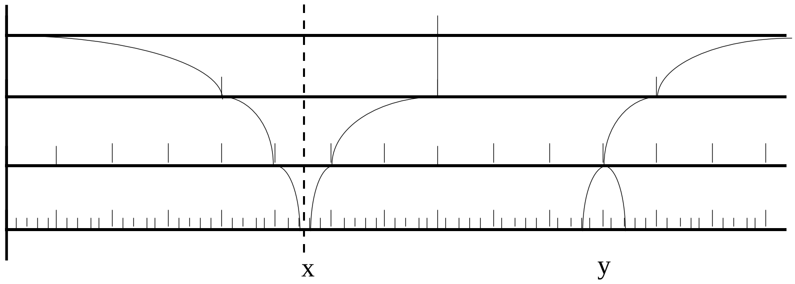


Figure 4. «plus proche» semble un choix peu judicieux car il laisse perdurer des intervalles eu égard à leur position temporelle et non à leur taille. Ainsi, un intervalle (x) peut se perpétuer alors qu'un autre intervalle (y), plus étendu, va disparaître dès la première montée.

Enfin, aucun des trois opérateurs de montée ne possède la propriété de transitivité cumulée qui avait été retenue comme très importante. Ceci est illustré par la figure 5.

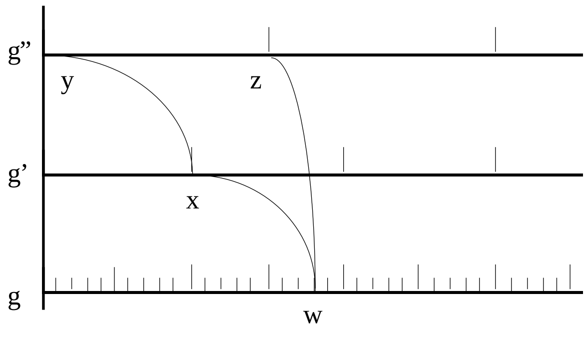


Figure 5. En cas de décalage des échelles (c'est-à-dire qu'à une graduation de la granularité supérieure ne corresponde pas de graduation de la granularité inférieure), la propriété de transitivité cumulée n'est pas vérifiée:

$${}_{g}\uparrow^{g'}.{}_{g'}\uparrow^{g''}\ w = y \neq z = {}_{g}\uparrow^{g''}\ w.$$

Pour obtenir cette propriété de transitivité cumulée à l'échelle de tout le système, il faut que la propriété suivante soit respectée:

$$\forall g, g' \in G, \exists n \in \mathbb{N}; g = n.g'.$$

Cette propriété est prise pour base du système de [MON 92]. Cette contrainte est relativement forte surtout lorsqu'il s'agit de l'appliquer à des granularités bien établies parce que l'apanage de spécialistes (ne serait-ce que les mètres et les pieds). Mais c'est à ce prix que les opérateurs ${}_g\mathrm{suiv}^{g'}$ et ${}_g\mathrm{prec}^{g'}$ respecteront la transitivité cumulée.

Le principe de la transformation ascendante des intervalles est:

$$\text{Si } {}_g\!\uparrow^{g'}\!<x^-\ x^+> = <{}_g\!\uparrow^{g'}\!x^-\ {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^+> \text{ alors } {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^- \neq {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^+ \text{ sinon } {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^- \ (= {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^+).$$

Il est à remarquer que la condition de non croisement permet d'affirmer que $<{}_g\!\uparrow^{g'}\!x^-\ {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^+>$ est bien un intervalle. Par ailleurs, ce principe (dans le cas des trois opérateurs proposés ci-dessus) entraîne la conclusion escomptée suivante:

$$\forall x^-, x^+;\ x^+ - x^- > g'/g \Rightarrow {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^- \neq {}_g\!\uparrow^{g'}\!x^+$$

dont la réciproque n'est pas vraie. Il ne faut, en effet, pas utiliser seule la règle proposée par Jerry Hobbs:

$$\forall x, y\ ({}_g\!\uparrow^{g'}\!x = {}_g\!\uparrow^{g'}\!y) \equiv |x-y| < g'/g,$$

qui revient à dire qu'il n'existe qu'un seul instant (voir §8)!

Enfin, il est aussi possible de définir des relations *numérico-symboliques* («deux heures avant»…). Disposer de telles relations permettrait de conserver une certaine précision dans la circulation ascendante des contraintes et, en particulier, le problème rencontré avec la table de transitivité ne se poserait pas: il sera possible de conserver, dans les relations, la présence d'un intervalle dont l'importance empêche l'identification de deux expressions qui ne doivent être confondues.

5. Circulation descendante

La circulation descendante semble, a priori, plus difficile à réaliser que la circulation ascendante. Ceci est dû au fait que pour un même moment numérique, il existe plusieurs représentants possibles dans la granularité inférieure: il faut donc choisir un représentant pour une classe de moments équivalents entre eux. Mais surtout, cela provient du fait que le représentant de cette classe peut aussi être un intervalle (voire plusieurs).

5.1. Conversion descendante symbolique

En descente, les intervalles restent des intervalles et les relations entre entités temporelles s'affaiblissent, c'est-à-dire que l'égalité de deux instants peut se révéler contredite sous une granularité plus fine.

En fait, les règles de propagation vers le bas posent des problèmes parce que:

1) Descendre un instant peut donner soit un instant, soit un intervalle (en tout cas cette expression temporelle existe encore au niveau inférieur).

2) Il est possible de descendre les contraintes, mais les contraintes perdent en précision avec la granularité.

La règle de descente pour les instants symboliques est la suivante:

relation: r	$^{g}\!\downarrow_{g'} r$
$<$	$<$
$=$	$< = >$
$>$	$>$

Table 8. Conversion descendante des relations entre instants.

Les règles de transformation des contraintes entre intervalles sont fournies dans la table ci-dessous:

relation: r	$^{g}\!\downarrow_{g'} r$	réciproque: r^{-1}	$^{g}\!\downarrow_{g'} r^{-1}$
b	b	b^{-1}	b^{-1}
d	d	d^{-1}	d^{-1}
o	o	o^{-1}	o^{-1}
s	o s d	s^{-1}	d^{-1} s^{-1} o^{-1}
f	d f o^{-1}	f^{-1}	d^{-1} f^{-1} o
m	b m o	m^{-1}	o^{-1} m^{-1} b^{-1}
e	o f^{-1} d^{-1} s e s^{-1} d f o^{-1}		

Table 9. Conversion descendante des relations entre intervalles.

Ces deux tables sont conformes au principe de compatibilité avec les tables 6 et 7. Les seules contraintes qui sont prises en compte au niveau «symbolique» sont que deux instants identiques à un niveau peuvent être distincts sous une granularité inférieure. De même, deux instants discernables sous une granularité élevée le resteront sous une granularité plus faible. Cela permet de garantir la condition de non croisement:

$$x > y \Rightarrow \neg(^{g}\!\downarrow_{g'} x < {}^{g}\!\downarrow_{g'} y)$$

De nouveau, cette relation de descente commute avec la réciprocité, c'est-à-dire que:

$$^{g}\!\downarrow_{g'} r^{-1} = (^{g}\!\downarrow_{g'} r)^{-1}$$

Il est possible de vérifier que la relation de descente est indépendante de la représentation; c'est-à-dire que si les intervalles sont exprimés en fonction de leurs extrémités (voir table 4), les règles de conversions des extrémités donnent lieu aux mêmes relations entre intervalles que les règles de conversions entre intervalles (table 9). Par contre, la transposition de la table 5 est génératrice d'imprécision dans les positions relatives des instants et intervalles: à chaque fois que l'égalité est prise comme critère de comparaison, les points peuvent être dissociés sous une granularité plus fine (voir table 10).

relation: r	${}^{g}{\downarrow}_{g'}r$
$<$	$<$
$\in$	$< \in$
$>$	$\in >$

Table 10. Conversion des relations entre instants et intervalles. La table obtenue à l’aide des relations (avant, commence, pendant, termine et après; voir §2.3.2) eut donné une similaire incertitude quant à la position de l’instant égal à une borne.

De même que précédemment, la composition de relations n’est pas distributive par rapport à la conversion. En effet, soient trois intervalles *x*, *y* et *z* en relation de la façon suivante: *x*b*y* et *y*s*z*, la transitivité indique naturellement que *x*b*z* ce qui, une fois converti, indique aussi que *x*b*z*. À l’opposé, si la conversion est réalisée d’abord, elle donne *x*b*y* et *y*{o s d}*z*, ce qui une fois propagé conduit à *x*{b o m d s}*z*. Ici, la descente initiale des relations a ajouté de l’incertitude quant à la relation entre *y* et *z*. Cette incertitude a bien sûr subsisté lors de la propagation de contraintes. Le résultat concernant les rapports entre propagation de contraintes temporelles et changement de granularité est le suivant:

$$ {}^{g}{\downarrow}_{g'} (\rho_1 \times \rho_2) \subseteqq ({}^{g}{\downarrow}_{g'} \rho_1) \times ({}^{g}{\downarrow}_{g'} \rho_2). $$

Le même résultat est valide pour les instants. Il conduit à opérer la propagation au niveau le plus élevé avant de descendre les contraintes résultantes. C’est en particulier le cas dans l’exemple précédent. Sachant que «l’arrivée du facteur» a lieu lorsque «j’allais chercher le courrier» qui a précédé «j’allais au marché», il s’en suit que «le facteur est passé» avant que «je n’aille au marché» et ce résultat peut être répercuté sous une granularité plus faible.

Encore une fois, le problème posé par cette propagation de contraintes pourrait être résolu en admettant que l’incertitude introduite par la descente est négligeable devant la différence entre *x* et *y*. Cela peut être obtenu grâce à des relations numérico-symboliques du type «deux jours avant»…

5.2. Conversion descendante numérique

L’aspect numérique est bien plus délicat. Il ne faut plus simplement trouver une classe d’équivalence, mais trouver un représentant de la classe d’équivalence considérée à la granularité supérieure. De surcroît, pour un instant, ce représentant de la classe d’équivalence peut être arbitrairement un autre instant (dans le cas où la persistance des instants à travers les niveaux est permise) ou un intervalle.

Un instant *x* peut donc être représenté par:

1) un instant. Le problème est alors de savoir où le placer: *x**g/g’, *x**g/g’+1 ? (la performance de Burke au 100m de 12" à la seconde doit elle être crédité de 11"01, 12" ou 12"99 au 1/100°?) Il s’agit d’une simple question de choix pour le représentant. Cela ne

pose pas, par contre, de problèmes difficiles. Cet opérateur de descente canonique peut être choisi en fonction de l'opérateur de montée de façon à disposer de la propriété de conservation descendante (${}^{g'}\!\downarrow_{gg}\!\uparrow^{g'}x = x$). Par conséquent,

$${}^{g}\!\downarrow_{g'}x = x*g/g' \text{ si } {}_{g}\!\uparrow^{g'} = {}_{g}\mathrm{prec}^{g'} \text{ et } {}^{g}\!\downarrow_{g'}x = x*g/g'+1 \text{ si } {}_{g}\!\uparrow^{g'} = {}_{g}\mathrm{suiv}^{g'}.$$

2) un intervalle de taille maximale g/g'. Une contrainte importante pour cet intervalle est de faire en sorte que l'instant en lequel il se convertisse en g' soit bien *x* (propriété de conservation descendante). Tout dépend donc, de nouveau, de l'option prise pour la conversion ascendante.

Une méthode astucieuse permettant de résoudre ce problème est de définir des «motifs» de conversion d'une granularité en une autre (c'est-à-dire la façon de décomposer un évènement particulier sous une granularité plus fine). Ces motifs présentent l'avantage de pouvoir être attachés à une granularité précise mais aussi à l'évènement auquel est attachée l'expression temporelle. Ils constituent la possibilité d'introduire dans le processus de conversion de la connaissance liée au domaine. Il est même possible de définir des motifs de conversion complexes. C'est le cas des histoires (voir §6.2).

Une autre méthode consiste à utiliser explicitement les outils proposés pour représenter l'incertitude temporelle, c'est le cas des *domaines d'occurrences possibles* (DOP) introduits par Jean-François Rit [RIT 88] qui permettent de représenter l'expression temporelle à descendre à l'aide de l'ensemble de contraintes qui pèsent sur elle. Les DOP décrivent un ensemble convexe d'intervalles dans lequel se trouve un intervalle particulier dont la position et la taille ne sont pas connues exactement. Un DOP est caractérisé par un quadruplé (début au plus tôt, début au plus tard, fin au plus tôt, fin au plus tard). Ainsi, à un intervalle $<x^- \, x^+>$, pourra être associé un DOP:

$${}^{g}\!\downarrow_{g'} <x^- \, x^+> = (g/g'.x^-, g/g'.x^-+1 \;\; g/g'.x^+, g/g'.x^++1)$$

Ces deux méthodes sont de nature différentes: la première contraint une représentation imprécise en ajoutant de l'information aux pures notions temporelles alors que la seconde offre un moyen de représentation de l'imprécision. Elles sont donc utilisables à des fins différentes.

En conclusion, il ne faut jamais perdre de vue que si une donnée est transmise d'une granularité vers une autre c'est parce qu'elle n'est pas disponible sous cette dernière granularité et qu'il est intéressant d'en disposer c'est peut être aussi parce que ces phénomènes sont mieux traités à la granularité indiquée. Aussi, si la conversion pose des problèmes, c'est toujours, finalement pour un gain substantiel.

Il faut enfin noter que dans les cas de la montée comme de la descente, l'appauvrissement des contraintes dû au changement de granularité est réellement symbolique: il ne peut s'appliquer qu'une fois. Ainsi:

$$\forall g>g'>g'' \text{ ou } g<g'<g'',\ {}_{g\rightarrow g'}\cdot{}_{g'\rightarrow g''}\, r = {}_{g\rightarrow g'}\, r$$

Ceci est tout à fait normal du fait que les relations sont considérées de la même façon, que l'opérateur soit appliqué de conversion vers g' ou vers g". C'est donc une propriété intéressante. En particulier, cela implique que la propriété de transitivité cumulée soit valide au niveau symbolique sans autre restriction.

Une fois les opérateurs de conversion proposés et leurs propriétés établies, il est possible de les utiliser de différentes manière de façon à faire coopérer différentes granularité. L'utilisation des opérateurs dépendra des propriétés requises par l'application. La section suivante présente une utilisation possible de la représentation granulaire sur un exemple simple.

6. Inférences temporelles

Représenter les informations temporelles communiquées et les restituer n'est pas suffisant pour un système de représentation temporel. Il faut qu'il soit capable de déterminer le plus tôt possible une inconsistance dans l'ensemble des informations et de compléter les informations communiquées quand le modèle du temps sous-jacent l'autorise, c'est le but des inférences temporelles.

La résolution de problèmes (et, en particulier, la satisfaction de contraintes) dans des mondes ouverts et complexes requiert une connaissance importante. Disposer de tant de connaissance exige d'éviter le piège de son exploration systématique afin de résoudre un problème bien *localisé*. Les systèmes de représentation de connaissance et de raisonnement peuvent tirer parti d'une organisation hiérarchique afin de résoudre localement les problèmes locaux et de résoudre plus globalement les problèmes plus étendus. En ce sens, la granularité peut aider à éviter l'explosion combinatoire en restreignant l'espace de recherche.

La propagation de ces contraintes a posé des problèmes lors de l'étude de la distributivité des opérateurs de conversion par rapport à la transitivité des relations. La granularité doit cependant permettre d'appliquer la propagation de contraintes de la manière la plus pertinente possible. C'est-à-dire au niveau où les résultats sont le plus ou le moins précis suivant la granularité escomptée. Ceci peut être réalisé à l'aide d'un résolveur de contraintes temporel classique capable d'effectuer les conversions de granularité adéquates. Un travail fait sur le logiciel TROPES qui lie granularité, représentation de connaissance par objets et propagation de contraintes temporelles est présenté ici.

6.1. TROPES et la représentation du temps

TROPES [MAR 90, 93] est un système de représentation de connaissance par objets. Il intègre la notion de point de vue de telle sorte qu'un objet puisse être vu de manière différente suivant chaque point de vue. Johannes Stein [STE 91] a réalisé sur le logiciel TROPES un système de représentation temporel granulaire. Dans cette représentation, un évènement est un objet référençant son occurrence temporelle, l'histoire à laquelle il appartient et l'histoire qui le